

'EXPRESS MAIL' LABEL NO.: EV392067891US  
I HEREBY CERTIFY THAT THIS PAPER IS BEING DEPOSITED WITH THE  
UNITED STATES POSTAL SERVICE 'EXPRESS MAIL POST OFFICE TO  
ADDRESSEE' SERVICE UNDER 37 CFR. 1.10 IN AN ENVELOPE ADDRESSED  
TO: THE COMMISSIONER OF PATENTS, P.O. BOX 1450, ALEXANDRIA, VA  
22313-1450, ON THIS DATE. THE COMMISSIONER IS HEREBY AUTHORIZED  
TO CHARGE ANY FEES ARISING HEREFROM AT ANY TIME TO DEPOSIT  
ACCOUNT 16-0877.

3-1-04  
DATE

Dr. Stuckrad  
SIGNATURE

DaimlerChrysler AG

Dr. Stuckrad

19.12.2003

Auslandsfassung

17497 U.S. PTO  
10/790383  
030104

Verfahren zum Laserschweißen  
mit Vor- und/oder Nachwärmung im Bereich der Schweißnaht

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Laserschweißen mit Vor- und/oder Nachwärmung im Bereich der Schweißnaht gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1.

Bei hohen Qualitätsanforderungen ist eine Wärmebehandlung von Schweißnähten bereits bekannt. Dies betrifft insbesondere höherfeste Stähle. Der Begriff höherfeste Stähle bezeichnet Stähle mit einer Zugfestigkeit von mehr als 300 MPa. Beim Schweißen derartiger höherfester Stähle zeigt sich im Bereich der Schweißnaht eine deutliche Aufhärtungsneigung, die einen Verlust an Duktilität nach sich zieht und so die Dauerfestigkeit und Qualität der Bauteile stark reduziert.

Als Abhilfe wurde bereits ein induktives Vor- oder Nachwärmen der Schweißnaht vorgeschlagen (Brenner et al; „Induktiv unterstütztes Laserstrahlschweißen zum rißfreien Fügen von härtbaren Stählen“ DVS-Bericht Bd. 216 (2001) S.289-297). Dies erfordert einen aufwendigen zusätzlichen Aufbau und liefert eine geringe Flexibilität hinsichtlich der Nahtgeometrie. Darüber hinaus muss die Aufspannung des Bauteils an die geänderten Erfordernisse angepasst werden.

Für andere Anwendungen, nämlich zum Schweißen beschichteter Bleche, wurde bereits vorgeschlagen, einen Energiestrahle durch einen speziellen Spiegel in mehrere Teilstrahlen aufzuteilen und nacheinander über die beschichteten Bleche laufen zu lassen, um so die Ausgasung der Beschichtung zwischen den Blechen zu vergleichmässigen, vgl. WO 00/66314 A1. Dies erfordert einen hohen apparativen Aufwand und hat zudem den

Nachteil, dass die Teilstrahlen in Bezug auf Fokuslage und Position relativ zueinander festgelegt sind.

Ebenfalls für die Anwendung des Schweißens beschichteter Bleche wurde bereits vorgeschlagen, einen einzigen Laserstrahl zunächst fokussiert zum Schweißen zu verwenden und denselben Laserstrahl danach defokussiert über die Naht zurückzuführen, um die im Nahtbereich verdampfte Beschichtung zu heilen, vgl. DE 69202224 T2. Dazu wird in einer ersten Arbeitsphase ein Laserstrahl starr senkrecht auf die zu schweißende Oberfläche orientiert und fokussiert und längs der Stoßfläche der zu schweißenden beschichteten Bleche derart geführt, dass er die Bleche miteinander verschweißt, wobei die Beschichtung entlang der Schweißnaht verdampft. In einer zweiten Arbeitsphase wird derselbe Laserstrahl defokussiert und entlang der Schweißnaht zu deren Beginn zurückgeführt. Die Defokussierung wird so gewählt, dass die bestrahlte Fläche deutlich breiter ist als die Schweißnaht. Die Bearbeitungsgeschwindigkeit wird so eingestellt, dass der Energieeintrag groß genug ist um die Beschichtung auf den bestrahlten Bereichen seitlich der Schweißnaht zu schmelzen aber nicht zu verdampfen. Die geschmolzene Beschichtung soll dann auch über die beschichtungsfreie Schweißnaht fließen, danach erstarren und so die Beschichtung des Blechs heilen.

Dieses Verfahren kann nur funktionieren, wenn die Schweißnaht vor der Heilbestrahlung bereits deutlich unter die Verdampfungstemperatur der Beschichtung abgekühlt ist. Darüber hinaus führt die Methodik des „Zurückfahrens“ entlang der Schweißnaht zu einer sehr ungleichmäßigen Oberflächenerwärmung, da die Wärmebehandlung mit konstanter Leistung erfolgt und zu Beginn Nahtbereiche bestrahlt werden, die kurz vorher geschweißt wurden, also noch heiß sind, und zu Ende der Wärmebehandlung bereits ausgekühlte Bereiche der Schweißnaht.

Außerdem gibt die Verdampfungstemperatur der Beschichtung eine im Vergleich zur Schweißtemperatur der Bleche sehr niedrige Obergrenze des zulässigen Energieeintrags an, die somit nur eine oberflächliche Erwärmung des dem Laserstrahl zugewandten Bleches zulässt, nicht aber eine durchgehende Wärmebehandlung der gesamten Schweißnaht.

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht daher darin, einen Verlust an Duktilität im Nahtbereich möglichst gering zu halten. Dies ist bei höherfesten Stählen besonders wichtig, da sich hier metallurgische Kerben und die damit verbundenen Spannungsüberhöhungen besonders negativ auswirken. Gleichzeitig soll der erforderliche apparativen Aufwand gering gehalten werden und die Bearbeitungszeit mindestens beibehalten, vorzugsweise vermindert werden.

Die Erfindung ist in Bezug auf das zu schaffende Verfahren durch die Merkmale des Patentanspruchs 1 wiedergegeben. Die weiteren Ansprüche enthalten vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen des erfindungsgemäßen Verfahrens (Patentansprüche 2 bis 5).

Die Aufgabe wird bezüglich des zu schaffenden Verfahrens erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass Schweißen und Vor- und/oder Nachwärmung im Bereich der Schweißnaht mittels eines einzigen Laserstrahls mit im wesentlichen gleicher Leistung durchgeführt werden, wobei Schweißen und Wärmebehandlung derart zeitlich beabstandet werden, dass die eingebrachte Energiemenge der ersten Bestrahlung für die zweiten Bearbeitungsphase genutzt werden kann. Die Temperaturabnahme der jeweiligen Bestrahlungsfläche vom Zeitpunkt der ersten Bestrahlung bis zum Zeitpunkt der nachfolgenden Bestrahlung beträgt weniger als 50 Prozent. Bei

der Wärmebehandlung wird der auf die Bestrahlungsfläche und Zeiteinheit bezogene Laserenergieeintrag durch Defokussierung des Laserstrahls und/oder Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit derart eingestellt, dass die dem Laserstrahl abgewandte Seite der bereits vorhandenen oder zukünftigen Schweißnaht um mindestens 10°C erwärmt wird.

Die Wärmehandlung wird zeitlich in geringem Abstand entweder vor (Wärmevorbehandlung) oder nach (Wärmenachbehandlung) der eigentlichen Schweißung durchgeführt. Die Wärmebehandlung kann auf zwei Arten erfolgen:

A) Der Laser wird mit im wesentlichen gleicher Leistung (wie zum Schweißen erforderlich) und gleicher Fokussierung aber erhöhter Vorschubgeschwindigkeit und ggf. mehrfach über den wärmezubehandelnden Nahtbereich geführt.

B) Der Laser wird mit im wesentlichen gleicher Leistung (wie zum Schweißen erforderlich) aber erhöhter Defokussierung und ggf. auch langsamer über den wärmezubehandelnden Nahtbereich geführt.

Selbstverständlich können auch Kombinationen aus Art A und Art B zum Einsatz kommen.

Durch die Wärmevor- oder Wärmenachbehandlung wird der Duktilitätsverlust deutlich gesenkt, insbesondere bei Wärmevor- und Wärmenachbehandlung der Schweißnaht.

Im Vergleich zur DE 69202224 T2 (, die einen anderen Anwendungszweck verfolgt,) entfallen erstens die Wartezeiten, wodurch die Bearbeitungszeit deutlich verkürzt wird. Zweitens erfolgt eine tiefergehende Erwärmung der gesamten Schweißnaht und nicht nur Ihrer Oberfläche. Erst dies ermöglicht es, den

Verlust an Duktilität im Nahtbereich gering zu halten. Darüber hinaus entfällt bei Variante A der bei der DE 69202224 T2 erforderliche ständige Wechsel zwischen dem fokussierten und dem defokussierten Laserstrahl und somit auch der dazu erforderliche apparative Aufbau.

Der wesentliche Vorteil gegenüber der WO 00/66314 A1 besteht darin, dass nur ein Laserstrahl und somit auch nur eine optische Einrichtung zur Laserstrahlführung benötigt werden, wodurch der apparative Aufwand verringert wird.

In einer vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird der Laserstrahl mittels einer Scanner-Einrichtung auf die Oberfläche gelenkt. Eine Scanner-Einrichtung ist eine besonders schnelle und flexible Strahl-ablenk-Einrichtung, beispielsweise ein Spiegelsystem (aus mindestens einem ein- oder mehr-achsig ansteuerbaren schwenkbaren Spiegeln) oder auch akusto-optische Modulatoren. In dieser Ablenk-Einrichtung kann auch eine mechanisch verstellbares optisches Element enthalten sein, das eine schnelle Veränderung der Fokuslage des Laserstrahls erlaubt (wie beispielsweise in einer 3D-Scanner-Einrichtung).

Der große Vorteil dieser Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens gegenüber den vorstehend genannten besteht darin, dass die Scanner-Einrichtung gleichmäßig relativ zur Oberfläche einer Platte bewegt wird (beispielsweise durch einen mehrachsigen Gelenkarmroboter) und dabei die Position des Laserstrahls in einem gegebenen Bearbeitungsbereich unterhalb der Scanner-Einrichtung extrem schnell durch die Spiegel der Scanner-Einrichtung verändert werden kann. Dadurch ist es möglich, den Laserstrahl für einen kurzen Bearbeitungszeitraum schnell und ggf. mehrfach über eine zu erwärmende Bearbeitungslinie zu lenken und dann sehr schnell den Laserstrahl

wieder auf deren Beginn umzulenken, um sie erneut aber diesmal langsamer für den Schweißvorgang abzufahren. Danach kann der Laserstrahl erneut sehr schnell auf den Beginn der Bearbeitungslinie umgelenkt werden, welche erneut schnell und ggf. mehrfach abgefahren und dabei erwärmt wird. Hierdurch entfallen sowohl die apparativen Einrichtungen für die optische Führung eines zweiten Laserstrahls - wie in der WO 00/66314 A1 - als auch die für die Umpositionierung des Laserstrahls erforderlichen Zeiten, während deren ein ausschließlich roboter-geführter Laserstrahl üblicherweise ausgeschaltet und/ oder defokussiert werden muß. Somit wird eine sehr hohe Auslastung des Lasersystems ermöglicht. Im Gegensatz dazu werden bei konventionellen Systemen Laserstrahlen mittels starrer Linsensysteme über die Bearbeitungslinien gelenkt. Um eine neue Schweißnaht zu beginnen, muß der Laserstrahl zu deren Beginn geführt werden und dazu muß das Linsensystem relativ zum Bauteil bewegt werden. Währenddessen muß der Laser ausgeschaltet werden, um unbeabsichtigtes Aufschmelzen des Bauteils zu vermeiden. Infolgedessen benötigt diese Ausgestaltung der Erfindung nur einen Bruchteil der Bearbeitungszeit im Vergleich zu konventionellen Systemen und einen geringeren apparativen Aufwand. Darüber hinaus ermöglicht sie aufgrund der höheren Flexibilität der Scanner-Einrichtung auch die bahntreue Wärmebehandlung und Schweißung auch komplizierterer Nahtmuster und das jeweils in einer einzigen Aufspannung des Bauteils.

In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird der Laserstrahl bei der Wärmebehandlung derart fokussiert, dass sich sein Fokus zwischen 0 und 50 mm, vorzugsweise zwischen 5 und 30 mm, insbesondere circa 20 mm, vor der Oberfläche der dem Laserstrahl zugewandten Platte befindet. Dadurch wird erreicht, dass die Bestrahlungsfläche des Lasers auf der Oberfläche dessen Bestrah-

lungsfläche im Fokus übersteigt, vorzugsweise mindestens doppelt so groß, besser 8 mal so groß ist.

Alternativ oder additiv dazu kann eine weitere Verbreiterung der Bearbeitungsfläche durch Bewegung der Bestrahlungsfläche mittels minimaler Umlenkung des Laserstrahls (Überlagerung einer transversalen Bewegungskomponente in Hauptvorschubrichtung; sog. Beam Spinning oder Strahlwedeln) erreicht werden. Das Beam Spinning kann bei beiden oder auch nur bei einem, vorzugsweise dem erwärmenden Verfahrensschritt angewandt werden.

Eine solche flächigere Erwärmung vergleichmäßigt das Aufschmelzen der Bleche und begünstigt die Ausbildung einer gleichmäßigen Schweißnaht.

In einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens erfolgen der erste und zweite Verfahrensschritt alternierend in der Art einer Steppnaht. D.h. zunächst wird eine kurze Bearbeitungslinie von 3 bis 40 mm Länge, vorzugsweise 15 mm, vorzugsweise mehrfach mit hoher Vorschubgeschwindigkeit des Laserstrahls abgefahren und so erwärmt und für das Schweißen vorbereitet (Wärmeverbehandlung). Danach wird der Laserstrahl zum Beginn der Bearbeitungslinie zurückgeführt und fährt diese erneut mit verringerter Vorschubgeschwindigkeit schweißend ab. Danach wird der Vorgang in einem geringen Abstand (3 bis 60 mm) in Vorschubrichtung wiederholt und danach erneut verschoben und wiederholt, so dass sich nach und nach eine gestrichelte Schweißnaht in der Art einer Steppnaht ausbildet.

Alternativ kann zunächst der Schweißschritt erfolgen und danach eine Wärmenachbehandlung oder auch ein Drei-Schritt-Verfahren mit Wärmever- und Wärmenachbehandlung.

Der Zeitraum zwischen dem ersten und zweiten Verfahrensschritt ist so gering, dass das Blech nur geringfügig abkühlt und somit der Laserstrahl während des zweiten Verfahrensschritts nur geringfügig langsamer geführt werden muss, um ausreichend Energie zum Aufschmelzen und Verschweißen der Bleche in diese einzubringen. Auf diese Weise bildet sich, insbesondere in Kombination mit der beschriebenen Wärmenachbehandlung, eine gleichmäßigere Schweißnaht mit deutlich geringerer Aufhärtungsneigung aus.

Nachfolgend wird anhand von drei Ausführungsbeispielen das erfindungsgemäße Verfahren näher erläutert:

Gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel werden zwei höherfeste Stahl-Bleche (wie sie üblicherweise im Automobilbau verwendet werden) übereinander ausgerichtet, eine Scanner-Einrichtung wird gleichmäßig darüber verfahren und lenkt einen Laserstrahl entsprechend der vorstehende Verfahrensvariante A, d.h. mit gleichbleibender Fokussierung, nacheinander auf mehrere Bearbeitungslinien. Die Scanner-Einrichtung besteht aus einem zwei-dimensional schwenkbaren computer-gesteuerten Spiegelsystem. Die Scannereinrichtung weist circa 300 mm Abstand zur Oberfläche des ersten Bleches auf. Der Fokus des Laserstrahls befindet sich bei der Wärmeverbehandlung (erster Verfahrensschritt) auf der Oberfläche des ersten Bleches.

Zunächst wird der Laserstrahl sehr schnell (Vorschubgeschwindigkeit: circa 15 m/min) und mehrfach vor und zurück über eine Bearbeitungslinie von circa 20 mm Länge geführt. Dabei wird ihm eine transversale Bewegungskomponente in Hauptvorschubrichtung überlagert; sog. Beam Spinning, so dass sich

eine langgezogene spiralförmige Bewegungsbahn ausbildet und sich die Bearbeitungslinie verbreitert. Dadurch erfolgt eine flächige und gleichmäßige Erwärmung der Bearbeitungsflächen mit nach außen kontinuierlich abnehmenden Temperaturgradienten. Diese Wärmeverbehandlung dauert circa 300 ms. Nach einer Umschaltzeit von circa 50 ms erfolgt das Laserschweißen entlang der erwärmten Bearbeitungslinie mit verringerter Vorschubgeschwindigkeit von circa 5 m/min (zweiter Verfahrensschritt). Das Schweißen dauert circa 250 ms. Auch beim Schweißen befindet sich der Fokus auf der Oberfläche des ersten Bleches. Die gleichmäßige Wärmeverbehandlung verringert die Abkühlgeschwindigkeiten beim Schweißen und damit den Duktilitätsverlust im Nahtbereich deutlich. Dies kann messtechnisch durch eine geringere Aufhärtung und eine erhöhte dynamische Belastbarkeit der Schweißnaht nachgewiesen werden.

Der ersten Bearbeitungslinie schließt sich eine zweite Erwärmungslinie sowie eine zweite Schweißnaht an. Diese alternierenden Verfahrensschritte werden fortgeführt, so dass sich eine gestrichelte Schweißnaht in der Art einer Steppnaht ausbildet.

In einem zweiten Ausführungsbeispiel gemäß der Verfahrensvariante B erfolgen Wärmebehandlung und Schweißen mit unterschiedlich fokussiertem Laserstrahl. Dazu enthält die Scannereinrichtung des vorherigen Ausführungsbeispiels zusätzlich ein optisches Element zur Verstellung der Fokuslage. Der Fokus des Laserstrahls befindet sich bei der Wärmeverbehandlung (erster Verfahrensschritt) circa 20 mm vor der Oberfläche des

ersten Bleches. Die Bestrahlungsfläche ist circa 8 mal größer als die Bestrahlungsfläche im Fokus.

Wärmebehandlung und Schweißen erfolgen analog zum ersten Ausführungsbeispiel. Die flächenspezifische Energiedichte beträgt bei der Wärmebehandlung wegen der Defokussierung weniger als ein zehntel des Schweißwertes, folglich kann die Vorschubgeschwindigkeit auf einen entsprechenden Wert verringert werden. Die Bearbeitungszeit für eine Überfahung zur Wärmebehandlung erhöht sich entsprechend. Da hier für die Wärmebehandlung nur eine Überfahung erforderlich ist, nimmt die Gesamtbearbeitungszeit im Vergleich zum ersten Ausführungsbeispiel nicht zu. Die Umschaltzeit zwischen Wärmebehandlung und Schweißen erhöht sich aufgrund der zusätzlich erforderlichen Änderung der Fokussierung auf 100 ms.

In einem dritten Ausführungsbeispiel wird analog zum ersten Ausführungsbeispiel verfahren, aber zusätzlich jeweils ein dritter Verfahrensschritt zur Wärmenachbehandlung eingeführt. Dadurch wird der Temperaturgradient der Bearbeitungslinie und der zeitliche Verlauf seines Absinkens weiter vergleichmässigt. Der Duktilitätsverlust im Nahtbereich wird weiter verringert.

Das erfindungsgemäße Verfahren erweist sich in den Ausführungsformen der vorstehend beschriebenen Beispiele als besonders geeignet für das Laserschweißen höherfester Stahl-Bleche in der Automobilindustrie. Es kann aber auch zum qualitativ verbesserten Schweißen anderer Materialien, insbesondere anderer Metalle aber auch von Kunststoffen, eingesetzt werden.

Insbesondere können so erhebliche Vorteile bezüglich der Nahtqualität, vor allem der Duktilität, erzielt werden, aber auch bezüglich des apparativen Aufbaus und der Bearbeitungszeit.

Die Erfindung ist nicht nur auf die zuvor geschilderten Ausführungsbeispiele beschränkt, sondern vielmehr auf weitere übertragbar.

So ist zum Beispiel denkbar, dass die Scanner-Einrichtung anstatt durch ein Spiegelsystem durch akusto-optische Modulatoren auszubilden. Ferner ist es möglich statt den Laserscanner über die Bauteiloberfläche zu führen, die Bauteile unter einem ortsfesten Scanner zu bewegen. Gegebenenfalls können Scanner und Bauteil eine gegenseitig koordinierte Bewegung vollführen.

DaimlerChrysler AG

Dr. Stückrad

19.12.2003

Patentansprüche

1. Verfahren zum Laserschweißen

mit Vor- und/oder Nachwärmung im Bereich der Schweißnaht,

- wobei Schweißen und Wärmebehandlung mittels eines einzigen Laserstrahls mit im wesentlichen gleicher Leistung durchgeführt werden,

d a d u r c h      g e k e n n z e i c h n e t ,

- dass Schweißen und Wärmebehandlung derart zeitlich beabstandet werden, dass die Temperaturabnahme der jeweiligen Bestrahlungsfläche vom Zeitpunkt der ersten Bestrahlung bis zum Zeitpunkt der nachfolgenden Bestrahlung weniger als 50 Prozent beträgt,                      und
- dass bei der Wärmebehandlung
  - der auf die Bestrahlungsfläche und Zeiteinheit bezogene Laserenergieeintrag durch Defokussierung des Laserstrahls und/oder Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit derart eingestellt wird, dass die dem Laserstrahl abgewandte Seite der bereits vorhandenen oder zukünftigen Schweißnaht um mindestens 10°C erwärmt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1,

d a d u r c h      g e k e n n z e i c h n e t ,

dass der Laserstrahl mittels einer Scanner-Einrichtung auf die Oberfläche gelenkt wird.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Laserstrahl bei der Wärmebehandlung derart defokussiert wird, dass sich sein Fokus zwischen 0 und 50 mm, vorzugsweise circa 20 mm, vor der Oberfläche der dem Laserstrahl zugewandten Platte befindet.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Laserstrahl während der Wärmebehandlung derart geführt wird, dass seiner Hauptvorschubrichtung eine transversale, vorzugsweise kreisförmige, Bewegungskomponente überlagert wird (sog. Beam spinning).

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass Schweißen und Erwärmen alternierend erfolgen in der Art einer Steppnaht.

DaimlerChrysler AG

Dr. Stückrad  
19.12.2003

Zusammenfassung

Verfahren zum Laserschweißen  
mit Vor- und/oder Nachwärmung im Bereich der Schweißnaht

Beim Schweißen höherfester Stähle zeigt sich im Bereich der Schweißnaht eine deutliche Aufhärtungsneigung, die einen Verlust an Duktilität nach sich zieht und so die Dauerfestigkeit und Qualität der Bauteile stark reduziert.

Zur Verbesserung der Nahtqualität wurde bereits ein induktives Vor- oder Nachwärmen der Schweißnaht vorgeschlagen. Dies erfordert einen aufwendigen zusätzlichen Aufbau und liefert eine geringe Flexibilität hinsichtlich der Nahtgeometrie. Darüber hinaus muss die Aufspannung des Bauteils an die geänderten Erfordernisse angepasst werden.

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht daher darin, einen Verlust an Duktilität im Nahtbereich zu verringern und dabei den erforderlichen apparativen Aufwand und die Bearbeitungszeit mindestens beizubehalten, vorzugsweise zu vermindern.

Die Aufgabe wird gelöst, durch ein Verfahren, bei dem Schweißen und Erwärmen mittels eines einzigen Laserstrahls mit im wesentlichen gleicher Leistung und Fokussierung aber unterschiedlicher Vorschubgeschwindigkeit durchgeführt werden.